

引用格式：常琦，杨维希，赵恒，等. 基于多传感器的裂纹扩展监测研究[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 223336. CHANG Q, YANG W X, ZHAO H, et al. A multi-sensor based crack propagation monitoring research[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 223336 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23336

# 基于多传感器的裂纹扩展监测研究

常琦<sup>\*</sup>，杨维希，赵恒，孟瑶，刘君，高鹤明

西安理工大学 机械与精密仪器工程学院，西安 710048

**摘要：**疲劳裂纹扩展是结构健康监测的主要问题之一，为了保证金属结构的可靠和安全运行，实时监测结构的疲劳裂纹扩展过程十分必要。针对结构裂纹扩展的问题，采用压电传感器(PZT)和电阻应变片两种传感器，提出结合能够连续监测结构损伤的被动监测方法以及对微小损伤敏感的主动监测方法对裂纹扩展进行综合监测，以提高裂纹扩展的监测水平。采用随机森林算法对裂纹长度进行识别，并使用D-S证据理论对两种传感器的识别结果进行数据融合，得到比单一传感器更准确、可靠的裂纹扩展识别结果。进行了基于应变和主动Lamb波的裂纹扩展监测实验研究，验证了该方法对提高裂纹扩展监测识别准确率的有效性和实用性。

**关键词：**疲劳裂纹扩展；Lamb波；随机森林(RF)；数据融合；D-S证据理论

中图分类号：V215.5<sup>+</sup>2

文献标识码：A

文章编号：1000-6893(2020)02-223336-12

疲劳损伤断裂是金属结构失效的主要形式，金属结构在使用过程中受到交变载荷的作用，不可避免地出现疲劳损伤，在应力集中部位极易产生疲劳裂纹，裂纹的萌生和扩展会造成结构的破坏，因此对裂纹进行在线监测是十分必要的<sup>[1]</sup>。近年来，对疲劳裂纹扩展的研究是结构健康监测的热点之一，结构健康监测的方法从信号的来源上可以分为主动监测和被动监测。主动监测通过对结构施加激励信号，分析传感器所接收到的结构响应信号实现结构健康监测。主动Lamb波技术的设备相对简单，可以实现板类结构远距离大面积检测。袁慎芳等<sup>[2]</sup>利用A<sub>0</sub>模式的互相关损伤因子实现了平尾大轴裂纹萌生及裂纹尺寸的定量化监测。李政鸿等<sup>[3]</sup>采用解析解和有限元解获得的应力强度因子预测的疲劳裂纹扩展寿命。赵晓辰等<sup>[4]</sup>推导

得到了无限板孔边单/双裂纹的Wu-Carlsson解析权函数，为工程结构的孔边裂纹问题提供了高精度的求解手段。Masserey和Fromme<sup>[5]</sup>研究了由紧固件孔侧的疲劳裂纹引起的高频Lamb波的散射。Cho和Lissenden<sup>[6]</sup>研究了不同发射-接收路径下的Lamb波在紧固件孔处疲劳裂纹上的传输特性。虽然主动监测方法在裂纹扩展监测方面有很多的应用，但是很难进行连续监测。被动方法是指随着裂纹增长而连续监测结构的某些参数的方法，这些参数包括声发射信号、应变、热能等。其中结构的应变受到裂纹扩展的影响，比较容易监测，并且可以实现连续监测。Verstrynge等<sup>[7]</sup>开发了一种用于裂纹扩展识别的分布式应变监测方法。王建国等<sup>[8]</sup>研究了铝合金的I-III复合型疲劳裂纹扩展规律，得到了裂纹尖端的应力强度因子。Co-

收稿日期：2019-08-02；退修日期：2019-09-09；录用日期：2019-10-21；网络出版时间：2020-02-25 00:00

网络出版地址：<http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200221.html>

基金项目：陕西省自然科学基金面上项目(2018JM5112)；陕西省教育厅自然科学专项(15JK1496)；国家自然科学基金青年基金(51406164)；国家自然科学基金(51775429)

\* 通信作者。E-mail: cqhardrocker@163.com

lombo 等<sup>[9]</sup>测量了钛合金和铝合金紧凑拉伸试样疲劳裂纹扩展过程中裂尖弹性应变场和残余应力场变化情况。Salvati 等<sup>[10]</sup>通过观察过载后裂纹尖端附近的宏观状态下的晶粒取向和晶格畸变,研究了裂纹闭合和残余应力的影响。由于结构裂纹扩展的情况比较复杂,在状态监测和故障诊断时采用单一传感器难以准确获取故障的特征,可靠性较低。本文利用 2 种传感器、2 种监测方法对裂纹扩展监测进行研究,不仅可以通过被动监测方法实现裂纹扩展的连续监测,而且可以发挥主动监测方法对微小损伤敏感的优点,将 2 种传感器进行优势互补,从而从不同的角度反映裂纹扩展的综合信息,通过融合判别获得更加准确的裂纹扩展监测结果。

综上,为了充分发挥主动和被动监测方法的优点,从多角度反映裂纹扩展程度,本文提出了利用压电和应变传感器综合监测裂纹扩展的方法,并通过 D-S 证据理论融合 2 种传感器的损伤信息,以达到更高的裂纹长度的识别精确度。通过实验研究证明了通过数据融合的裂纹扩展综合监测方法可以大大提高裂纹扩展的识别准确性,同时也验证了该方法的有效性和实用性。

## 1 裂纹扩展监测原理

### 1.1 基于应变的疲劳裂纹扩展监测方法

当构件经受循环载荷拉伸时,微观裂纹从零部件的局部应力最高区域或最薄弱的晶粒上形成,然后逐渐发展成为宏观裂纹并进一步发展,最终导致疲劳断裂<sup>[11-12]</sup>。裂纹附近的应变在裂纹扩展过程中会发生变化,为了获得裂纹扩展过程中裂纹周围应变的物理特性,对裂纹扩展进行仿真分析,得到相应状态下的应变量,并将得到的应变数据与实验监测的数据进行比较。

本文采用有限元分析软件 ABAQUS 进行仿真分析,试件的基本尺寸为 240 mm×60 mm×2 mm,试件中间预制了一个尺寸为 10 mm×0.2 mm×2 mm 的凹槽,以此来控制裂纹的扩展方向,如图 1(a)所示。试件的材料是 LY12-CZ 铝合金,弹性模量为  $E=7.24\times10^4$  MPa,泊松比为  $\nu=0.32$ ,模型两端承受的最大载荷为 8.5 kN,应力比为 0.1,加载频率为 10 Hz,PY-

THON 脚本语言用于分析 ABAQUS 软件平台上的疲劳裂纹扩展。图 1(b)为平板受拉伸载荷时的应力云图,可以看出,裂纹尖端和两侧的应变变化更为明显,因此提取图示 3 个位置的应变数据,其中 3 个应变传感器分别命名为 TH1、TH2、TH3。

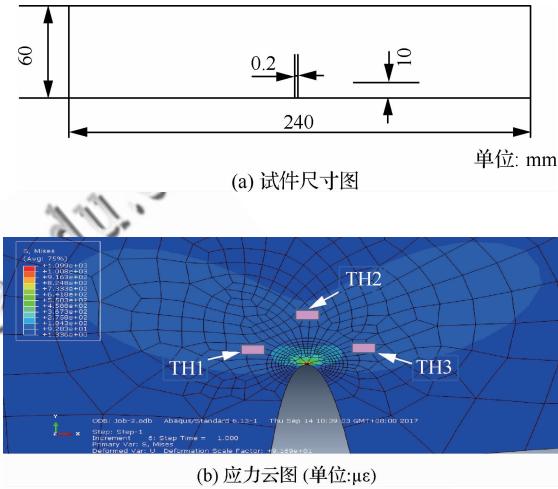


图 1 有限元仿真  
Fig. 1 FEM simulation

对于矩形板,应力强度因子为

$$K = F\sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中: $K$  为应力强度因子; $\sigma$  为施加的应力; $a$  为裂纹长度; $F$  为形状因子。

图 2 表示疲劳裂纹的连续扩展过程,从图中可以看出裂纹长度随着循环载荷的增加而增大,应变场也发生变化,从而可以监测裂纹的增长。

裂纹长度通过 Paris 公式确定<sup>[13]</sup>,载荷的循环次数与裂纹长度之间的关系如图 3(a)所示,可以看出,裂纹在 6 000 次循环时开始扩展,在 6 000~20 000 次之间稳定扩展,20 000 次之后突然快速扩展直至断裂,这与疲劳裂纹扩展定律一致。

根据图 1 所示的仿真应力云图,提取了参考点在 Paris 线性区的应变值,并在图 3(b)中得到了应变随循环次数的变化曲线。从图中可以看出,裂纹两侧位置由于受拉应力作用,随循环次数的增长应变不断增大,而裂纹尖端则由于受压应力的作用,应变随循环次数的增大不断减小。

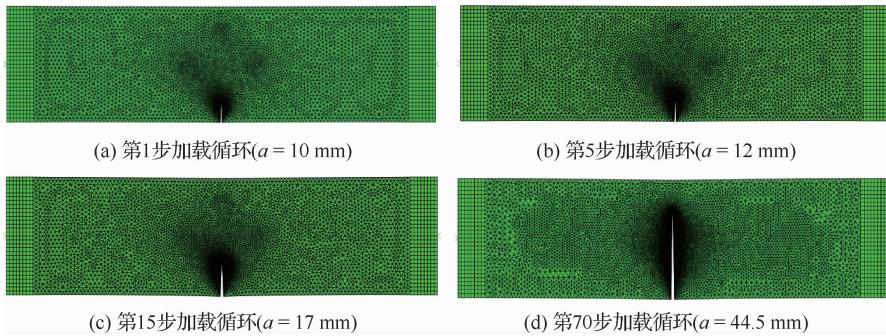


图 2 裂纹扩展仿真过程

Fig. 2 Processes of crack propagation simulation

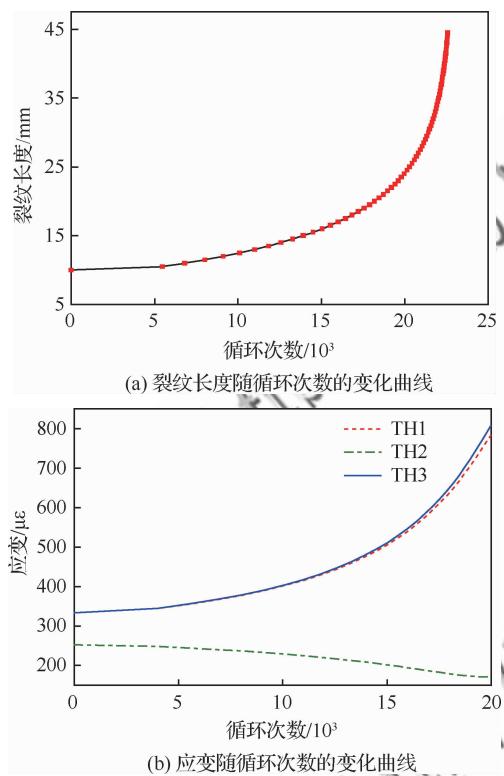


图 3 裂纹长度和应变随循环次数的变化曲线

Fig. 3 Curves of crack length and strain with number of cycles

## 1.2 基于主动 Lamb 波监测技术的裂纹扩展监测

Lamb 波是指在平行无边界的板结构中横波和纵波耦合而成的一种特殊形式的应力波, Lamb 波对结构表面和内部缺陷非常敏感, 故可用于监测材料表面的裂纹<sup>[14]</sup>。基于主动 Lamb 波的裂纹扩展监测总结为 3 个步骤: ① 在被测结构中选取一个压电传感器作为激励器, 使其在结构中传

播 Lamb 波; ② 结构中的另一个压电传感器接收 Lamb 波响应信号; ③ 当结构出现裂纹时, 在结构上传播的 Lamb 波将与损伤相互作用并引起反射和散射, 并且 Lamb 波的传播路径会发生改变, 将采集到的带有损伤信息的 Lamb 波响应信号进行数据处理, 提取出能够最大程度地反映信号特征的参数, 对损伤进行系统评估。根据 Lamb 波的频散曲线可知, 在频厚积较小时,  $S_0$  模式是最先到达的波, 易于提取相关参数, 故本文选择 Lamb 波对称模式的  $S_0$  模态作为数据处理对象, 提取其作为损伤特征参数。基于主动 Lamb 波的监测方法中, 汉宁窗调制的五周期正弦信号通常作为 Lamb 波的激励信号, 其函数表达式为

$$S(t)_{\text{excitation}} = \sin(2\pi ft) \{ 0.08 + 0.46[1 - \cos(2\pi ft/5)] \} \quad (2)$$

## 2 实验研究

### 2.1 实验系统

实验试件的设置和 3 个应变传感器的粘贴位置都与仿真模型一致, 在试件上预制了长度为 10 mm 的裂缝, 以控制裂纹扩展的位置和方向。传感器布置如图 4 所示, 应变传感器的数据由 TST3828E 动态应变测试仪采集, 采集频率为 1 kHz。压电传感器布置如图所示, Lamb 波由信号发生器激发, 并由 PICO4824 示波器采集 Lamb 波信号。在实验中, 使用 PA-100 疲劳试验机对实验试件施加频率为  $f = 10 \text{ Hz}$ 、最大疲劳载荷  $F_{\max} = 8.5 \text{ kN}$ 、应力比  $R = 0.1$  的正弦信号载荷谱。在实验过程中, 通过放大镜观察裂纹长度。

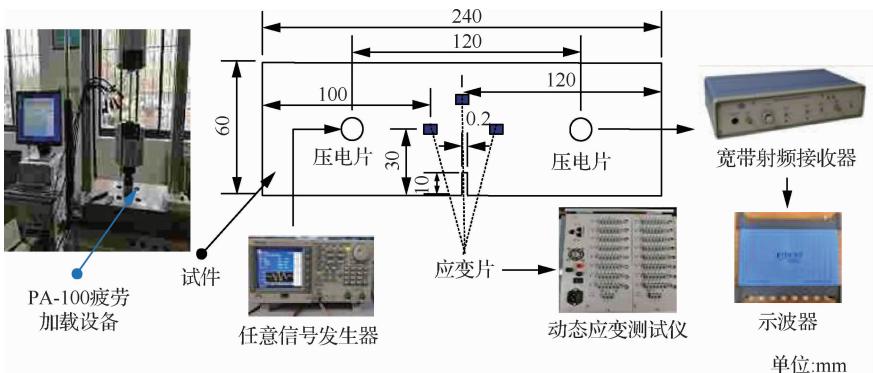


图 4 裂纹扩展监测实验系统配置

Fig. 4 Crack propagation monitor experimental system configuration

## 2.2 实验过程

在疲劳试验机上共进行了 5 个试件的实验，其中 3 个试件表面贴有应变片和压电传感器 (PZT)，另外 2 个试件表面只贴有应变片。在进行一定次数的循环加载后，停止试验机，观察裂纹长度，并进行 Lamb 波的数据采集，动态应变测试仪则对应变数据进行连续采集。采集的部分数据如图 5 和图 6 所示。

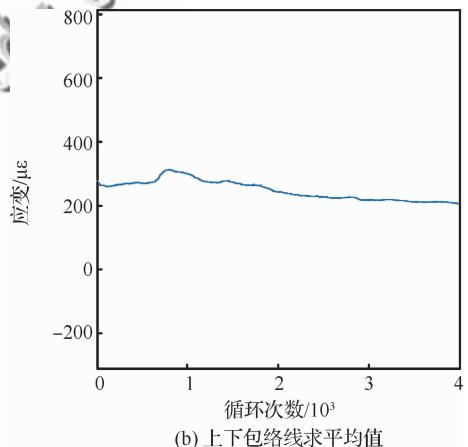
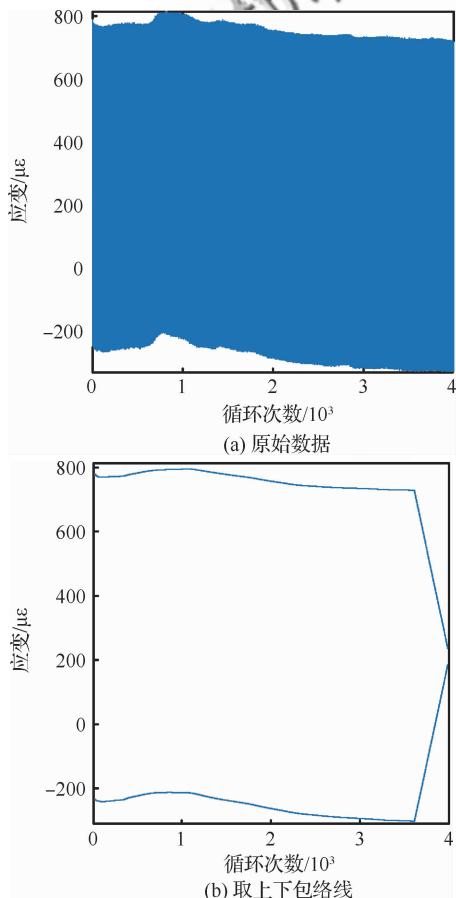


图 5 应变片的裂纹扩展监测结果

Fig. 5 Crack propagation monitoring results of strain gauges

### 2.2.1 应变片实验数据

图 5 为应变片 1 位置处 0~4000 个循环内应变随循环次数的变化，图 5(a)为应变采集的原始数据，图 5(b)为对采集的数据上下包络线进行提取，图 5(c)为求取上下包络线的平均值，以此消除拉伸过程中产生的弹性变形。对实验的每个试件的各个应变片采集的数据分别作此处理，得到应变随循环次数的变化曲线。

### 2.2.2 PZT 实验数据

由于 Lamb 波的频散特性，在不同的频率激励下受损结构的 Lamb 波传感信号是不同的。实验中，在相同的裂纹长度下进行间隔为 50 kHz、范围为 250~400 kHz 的频率扫描，图 6 是激励信号中心频率为 300 kHz 时接收的 Lamb 波的波

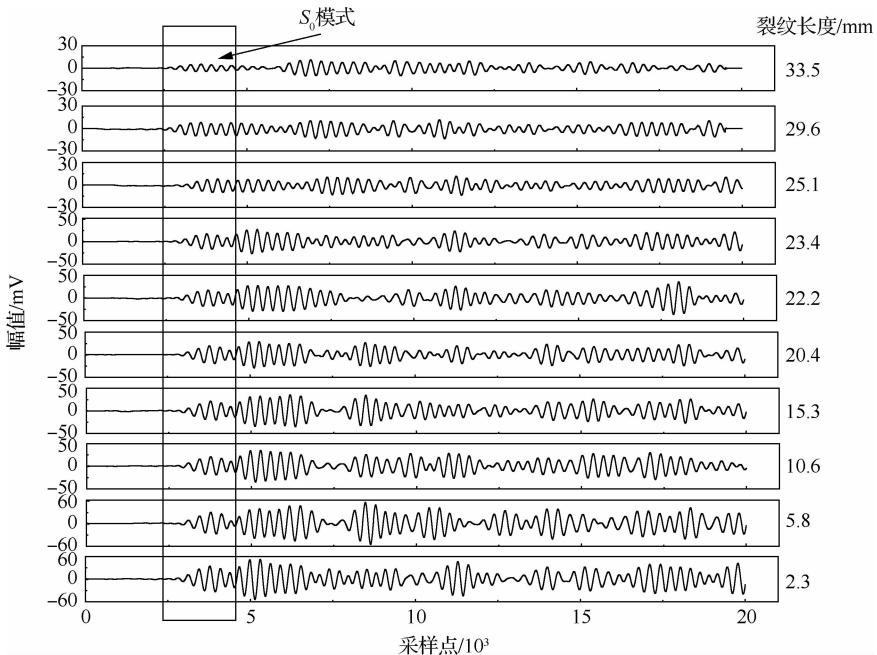


图 6 压电传感器的裂纹扩展监测结果

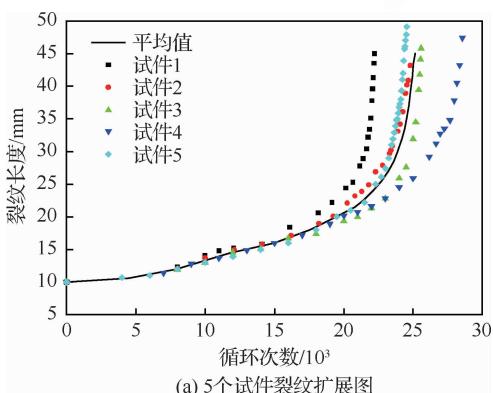
Fig. 6 Crack propagation monitoring results of PZT

形。在图 6 中,仅显示了裂纹扩展过程中的 10 个裂纹长度下的波形,从中可以看出,随着裂纹长度的增加,Lamb 波  $S_0$  模式的幅值不断减小。

## 2.3 特征参数提取

### 2.3.1 应变数据特征参数提取

5 个实验试件的裂纹扩展长度随循环次数的变化如图 7(a)所示,可以得出,实验结果与疲劳裂纹扩展规律一致。对第 4 个试件 20 000 次循环之前传感器采集到的应变数据进行曲线拟合,如图 7(b)所示,可以看出,裂纹两侧的应变片 1 和 3 随着裂纹的扩展而增大,而应变片 2 则随着裂纹的扩展而减小。



(a) 5 个试件裂纹扩展图

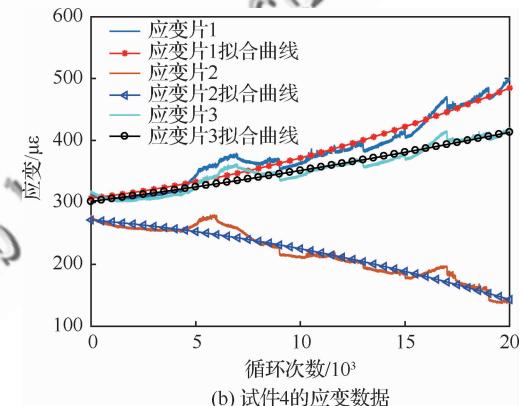


图 7 应变片的裂纹扩展长度与应变监测结果

Fig. 7 Crack propagation length and strain monitoring results of strain gauges

由于受拉应力作用,应变随循环次数的增长不断增大,而裂纹尖端位置的应变片 2 则由于受压应力的作用,应变随循环次数的增大不断减小。

### 2.3.2 PZT 数据特征参数提取

在基于主动 Lamb 波方法的裂纹扩展监测实验中,将裂纹扩展过程中的 Lamb 波的  $S_0$  模式的幅值和时间作为裂纹长度的特征参数。图 8 表明

了波达时间的选取方法,图 9 表明了 Lamb 波  $S_0$  模式的幅值随着裂纹长度的增加逐渐减小,波达时间逐渐增加。在图 9(b)和图 9(c)中分别给出了多个试件在同一频率下的  $S_0$  包络峰值与波达时间的平均值及拟合曲线。

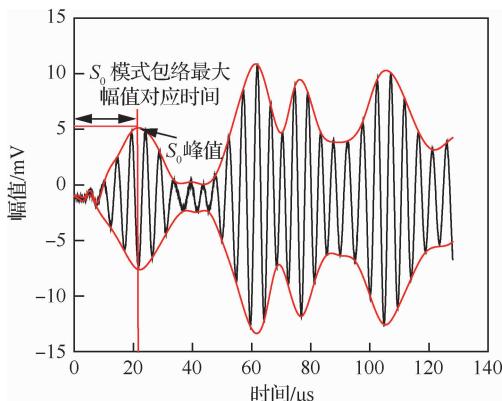


图 8 波达时间

Fig. 8 Time of arrival of wave

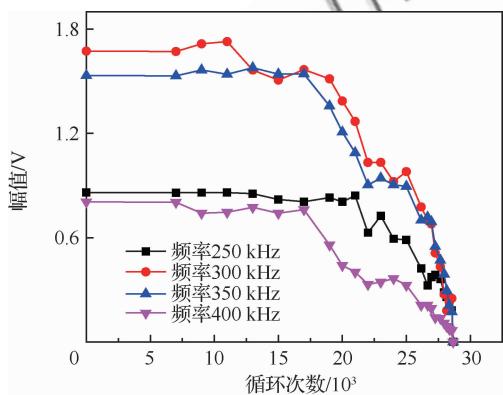
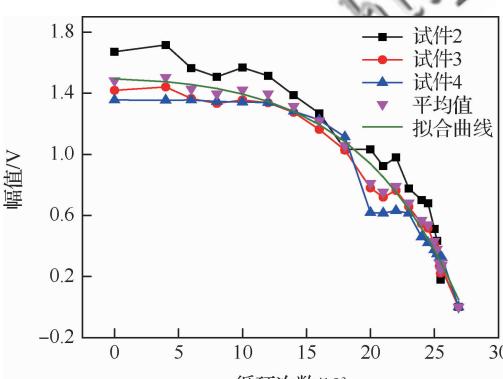
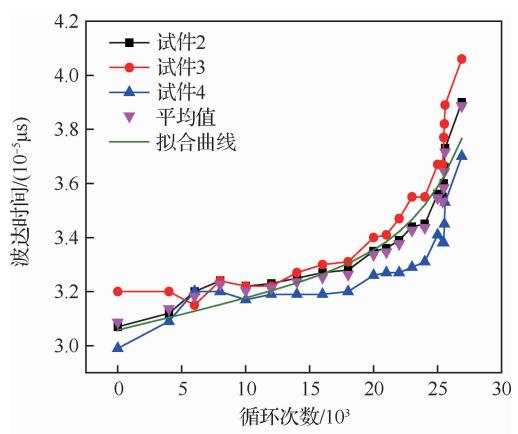
(a) 第4个试件的  $S_0$  模式幅值(b) 300 kHz 频率3个试件的  $S_0$  模式幅值(c) 300 kHz 频率3个试件的  $S_0$  模式波达时间

图 9 裂纹扩展监测实验结果(PZT)  
Fig. 9 Crack propagation monitoring experiment result (PZT)

### 3 裂纹扩展模式识别方法

裂纹扩展的判别是监测裂纹的一个主要任务,通过模式识别方法确定裂纹扩展的长度,以达到对裂纹扩展程度的监测。蒋黎星和侯进<sup>[15]</sup>采用了一种快速随机森林(RF)经典算法,对大量的训练数据进行有效分类和标注,提高了分类的精度和运行时间。Luo 等<sup>[16]</sup>提出了一种概率森林,在脸部识别上显示出了杰出的稳定性。魏静明和李应<sup>[17]</sup>通过提取增强功率的纹理特征,利用随机森林作为分类器识别出鸟鸣声。因为随机森林算法对样本的依赖小,模式识别性能好,可以更好地解决分类问题,所以本文采用随机森林算法对应变和压电传感器数据分别进行模式识别。

#### 3.1 随机森林算法及识别结果

随机森林由  $k$  棵决策树组成,利用 Bagging 方式建立决策树,从训练集中有放回地随机抽取  $k$  个大小相同的训练样本集,再从候选特征集中随机选取特定数目的特征,根据划分性能最优的情形来进行特征集划分<sup>[18]</sup>。

设分类器  $h_k(\mathbf{X})$  未抽取的数据集为  $O_k(\mathbf{X})$ ,则将输入随机向量  $\mathbf{X}$  在  $O_k(\mathbf{X})$  中投票的分类类别为  $Y_j$  的比例  $Q(\mathbf{X}, Y_j)$  定义为

$$Q(\mathbf{X}, Y_j) = \frac{\sum_{k=1}^k I(h_k(\mathbf{X}) = Y_j, (\mathbf{X}, Y) \in O_k)}{\sum_{k=1}^k I(h_k(\mathbf{X}), (\mathbf{X}, Y) \in O_k)} \quad (3)$$

得到随机森林的边缘函数为

$$\text{mr}(\mathbf{X}, Y) = P(h_k(\mathbf{X}) = Y - \max_{j \neq Y} P(h_k(\mathbf{X}) = j)) \quad (4)$$

式中:  $\text{mr}(\mathbf{X}, Y)$  表示随机森林中正确投票率相对于非正确投票率的测度<sup>[19]</sup>。

基于压电传感器数据进行模式识别时,本文共选择了 8 种主要属性集;4 个频率下的幅值和波达时间数据;10 个最终分类结果集;裂纹长度的 10 种模式。在构建单棵决策树时,先通过计算信息增益比,选出信息增益比最大的属性作为根节点,为 300 kHz 频率下的时间;接着在剩下的属性集中计算出最大信息增益比的属性,为 350 kHz 频率下的幅值,以此类推,直到构建出一棵完整的决策树,基于应变的数据进行同样的决策树构建。随机森林模型是在整个数据集中,随机选取一定数量的数据,每组数据都要构成上述的单棵决策树,大量的决策树组成了随机森林。当需要进行分类时,将测试数据代入到随机森林模型中,数据经过随机森林的每棵决策树,得到不同的结果,最终利用众数投票方式选出投票数量最多的值,以此为决策结果。在本文中 10 个裂纹长度所对应的模式中选择那个投票数最多的模式。随机森林算法流程如下:① 将数据集通过自助法重采样技术,有放回地重复随机抽取样本生成训练样本集合;② 采用 C4.5 算法来选择分裂属性,构造决策树;③ 重复以上步骤 400 次,即生成 400 棵决策树,形成随机森林;④ 对于测试数据,经过每棵数进行决策,最终投票确认分到哪一类。随机森林算法流程如图 10 所示。

结构中的裂纹萌生并不代表结构完全不能使

用,但存在一定的危险性,因此对裂纹早期扩展进行监测是十分必要的。裂纹长度的不断增加代表结构的剩余有效寿命逐渐减少,因此建立裂纹长度模式,通过模式识别就可以实现对其剩余寿命的定量分析。本文将裂纹扩展的线性增长区作为研究对象,从图 7(a)中可以看出,裂纹长度为 11~20 mm 阶段下的裂纹增长较为缓慢,是线性增长区,之后便进入了裂纹快速增长期。将研究区域共分为 10 种模式,每增加 1 mm,将其视为一种新的模式。

表 1 是使用随机森林算法对一组压电传感器

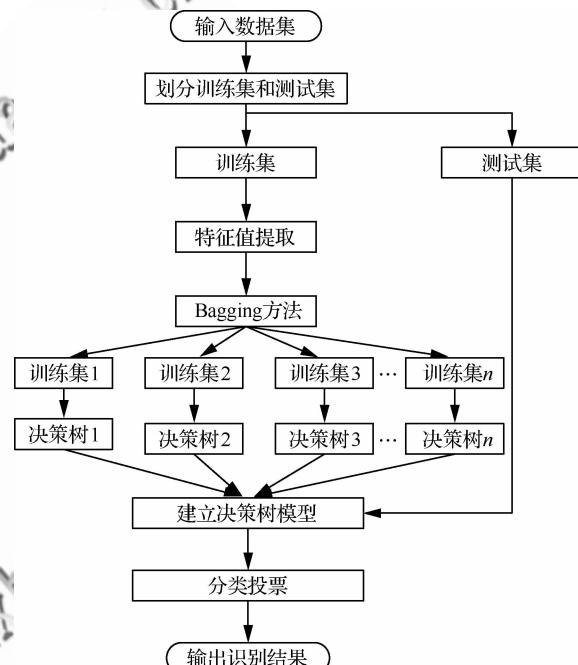


图 10 随机森林算法流程

Fig. 10 Flowchart of random forest algorithm

表 1 压电传感器模式识别结果

Table 1 Pattern recognition results of piezoelectric sensor

压电传感器数据	时间/ $\mu\text{s}$	裂纹长度/mm	裂纹长度对应模式	识别结果
(0.806, 1.386, 1.208, 0.44)	(30.7, 32, 29.9, 28.9)	11	1	1
(0.842, 1.268, 1.089, 0.402)	(32, 31.5, 32, 30.1)	12	2	2
(0.629, 1.033, 0.903, 0.332)	(32.2, 32.2, 31.7, 30.1)	13	3	3
(0.726, 1.033, 0.943, 0.344)	(32.5, 32.7, 31.9, 30.4)	14	4	4
(0.593, 0.922, 0.904, 0.360)	(32.8, 33.1, 32, 30.5)	15	5	5
(0.587, 0.880, 0.895, 0.326)	(36, 34.1, 32.7, 30.7)	16	6	4
(0.422, 0.776, 0.7, 0.212)	(34.4, 35.5, 32.9, 30.8)	17	7	7
(0.325, 0.7, 0.717, 0.212)	(35.6, 36.7, 34.1, 31.5)	18	8	8
(0.373, 0.679, 0.691, 0.194)	(36, 37.7, 33.8, 32)	19	9	9
(0.385, 0.512, 0.548, 0.14)	(37.3, 38.9, 35.3, 32.8)	20	10	10

数据进行模式识别的结果,可以看出,该组识别结果中有一种模式识别错误,识别准确率为90%,表2是一组应变传感器数据的模式识别结果,该组识别结果中有一种模式识别错误,识别准确率为90%。将获得的压电和应变传感器数据分别

进行交叉验证,得到模式识别平均准确率为86.7%和90%。从识别结果来看,随机森林算法可以比较准确地对裂纹扩展过程中的裂纹长度进行模式识别。

表2 应变传感器模式识别结果

Table 2 Pattern recognition results of strain sensor

应变传感器数据/ $\mu\epsilon$	裂纹长度/mm	裂纹长度对应模式	识别结果
(336.6,250.4,327.9)	11	1	1
(352.5,238.9,338.9)	12	2	3
(368.5,227.7,349.2)	13	3	3
(384.5,216.1,359.2)	14	4	2
(400.5,204.1,368.8)	15	5	5
(416.7,192.6,378.1)	16	6	6
(433.6,180.6,387.1)	17	7	7
(450.1,168.6,395.8)	18	8	8
(466.7,156.2,404.4)	19	9	8
(483.8,143.8,412.4)	20	10	10

### 3.2 D-S 证据理论及融合后识别结果

随机森林算法虽然能够比较准确地识别裂纹长度,但还是存在个别模式识别错误,为了进一步提高裂纹长度模式识别的准确性,并且充分发挥2种监测方法对裂纹扩展监测、识别的优点,本文采用D-S证据理论对2种传感器的模式识别结果进行数据融合。该算法结构简单,能较好地处理不确定信息。本文采用了决策级融合,其对传感器有很强的适应性,识别结果更为准确可靠<sup>[20]</sup>。D-S证据理论有3个重要的函数:基本概率分配函数(BPA或m)、信任函数(Bel)、似然函数(Pl)<sup>[21]</sup>。在D-S证据理论中,一般用集合来表示命题,也就是对某一需要判决的问题,将所有可能的解用集合 $\Theta$ 表示,称集合 $\Theta$ 为识别框架,即

$$\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N\} \quad (5)$$

基本概率分配函数 $m(\cdot)$ 是一个从集合 $2^\Theta$ 到 $[0,1]$ 的映射,对任意的 $A \subseteq \Theta$ ,函数 $m(A) \rightarrow [0,1]$ 满足条件:

$$\begin{cases} m(A) = 0 & A = \varphi \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 & A \neq \varphi \end{cases} \quad (6)$$

则称 $m(A)$ 为事件 $A$ 在识别框架 $\Theta$ 上的基本概

率分配函数。 $m(A)$ 表示证据对 $A$ 的信任程度。基本概率分配函数根据监测所得数据构造而来,或者是专家凭经验给出<sup>[22]</sup>。

对于任意 $A \subseteq \Theta$ ,信任函数(Bel)的定义为

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (7)$$

对于任意 $A \subseteq \Theta$ ,似然函数(Pl)的定义为

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B = \varphi} m(B) \quad (8)$$

给定几个同一识别框架上基于不同证据的基本概率分配函数,就可以利用D-S合成法则融合出一个多证据联合作用下的概率分配函数<sup>[23]</sup>。设Bel1和Bel2是同一识别框架 $\Theta$ 上2个独立证据的信任函数, $m_1$ 、 $m_2$ 是这2个信任函数所对应的基本概率分配函数。由D-S合成法则,可以得到综合之后的基本概率分配函数 $m_A \oplus m_B$ 。

$$m(A) =$$

$$\begin{cases} 0 & A = \varphi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) \times m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) \times m_2(B_j)} & A \neq \varphi \end{cases} \quad (9)$$

本文选择10种模式进行识别,将其构建为

“识别框架”,数据融合流程如图 11 所示。

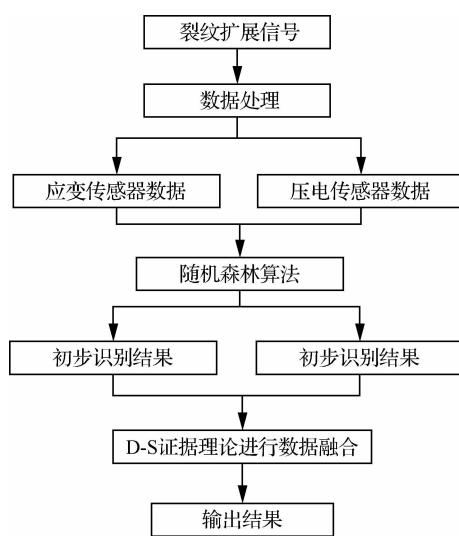


图 11 数据融合算法流程

Fig. 11 Flowchart of data fusion algorithm

将裂纹长度模式 4 的识别结果在表 3 中列出。在数据融合时,基于随机森林算法的压电和应变传感器数据的基本概率由决策树的投票率给出。可以从表 3 中看出,基于应变数据对裂纹长度模式 4 的识别是错误的,经过数据融合后,模式识别的结果则为正确的,因此,基于 D-S 数据融合

方法可以提高裂纹扩展的模式识别准确率。

表 4 中列出了数据融合后所有 10 种模式的识别结果,可以看出,在数据融合后,表中的一组模式识别准确率达到了 100%,与数据融合之前的模式识别率进行比较,显然,使用 D-S 数据融合方法可以显著提高裂纹扩展的裂纹长度模式识别准确率。

表 3 模式 4 识别结果及基本概率分配

Table 3 Pattern 4 recognition results and basic probability distribution

模式类别	RF(应变片) BPA/%	RF(PZT) BPA/%	识别准确率/%
1	0	7	0
2	1.75	28.25	7.42
3	8.5	0	0
4	26.25	9	35.4
5	16	9	14.4
6	22.5	9	20.2
7	9.75	9	8.78
8	10	9	8.9
9	5.25	9	4.72
10	0	9	0

表 4 一组模式识别结果  
Table 4 A set of pattern recognition results

模式类别	RF(应变片)		RF(PZT)		数据融合	
	识别结果	正确模式投票率/%	识别结果	正确模式投票率/%	识别结果	识别准确率/%
1	1	83.45	1	86.75	1	89.78
2	2	34	2	58.25	2	57.91
3	3	91.6	3	55.75	3	95.41
4	4	72.4	2	39	4	53.45
5	5	90	5	51	5	97.29
6	4	59.25	6	53.5	6	96.45
7	7	71.75	7	53.25	7	95.1
8	8	89.5	8	67.5	8	90
9	9	64.75	8	37.25	9	92.4
10	2	68.75	10	86	10	93.5

## 4 结 论

1) 本文提出基于应变和压电 2 种传感器从

主动和被动 2 种监测方法的角度对疲劳裂纹扩展进行综合监测,以达到对裂纹扩展程度进行高效准确地监测和识别,选取 Lamb 波  $S_0$  模式的包络

幅值及其对应波达时间作为损伤特征参数。

2) 本文采用随机森林算法分别对疲劳裂纹扩展过程中的2种监测方法获得的数据进行了模式识别研究,证明了随机森林算法在裂纹扩展识别中的有效性。

3) 为了进一步提高裂纹扩展识别精度,充分挖掘和发挥2种监测方法对裂纹扩展监测的能力和优点,本文采用基于D-S证据理论的数据融合方法,融合2种监测方法的识别结果,对裂纹扩展进行综合判别,从而达到高精度的裂纹扩展识别效果。

4) 通过实验研究验证了本文所提出的基于多传感器的裂纹扩展综合监测方法能够有效地对裂纹扩展进行监测,通过数据融合可以有效提高裂纹扩展监测和识别的精确度,证明了该方法的可靠性。

## 参考文献

- [1] ANGULO Á, ALLWRIGHT J, MARES C, et al. Finite element analysis of crack growth for structural health monitoring of mooring chains using ultrasonic guided waves and acoustic emission[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 217-224.
- [2] 杨伟博,袁慎芳,邱雷.基于Lamb波的平尾大轴裂纹扩展监测[J].振动·测试与诊断,2018,38(1): 143-147, 211-212.
- YANG W B, YUAN S F, QIU L. Crack growth monitoring of horizontal stabilizer shaft based on Lamb wave[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 143-147, 211-212 (in Chinese).
- [3] 李政鸿,徐武,张晓晶,等.多孔多裂纹平板的疲劳裂纹扩展试验与分析方法[J].航空学报,2018,39(7): 221867.
- LI Z H, XU W, ZHANG X J, et al. Experimental and analytical analyses of fatigue crack growth in sheets with multiple holes and cracks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(7): 221867 (in Chinese).
- [4] 赵晓辰,吴学仁,童第华,等.无限板孔边裂纹问题的高精度解析权函数解[J].航空学报,2018,39(9): 221976.
- ZHAO X C, WU X R, DONG D H, et al. Accurate analytical weight function solutions for crack at edge of circular hole in infinite plate[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(9): 221976 (in Chinese).
- [5] MASSEREY B, FROMME P. Analysis of high frequency guided wave scattering at a fastener hole with a view to fatigue crack detection[J]. Ultrasonics, 2017, 76: 78-86.
- [6] CHO H, LISSENDEN C J. Structural health monitoring of fatigue crack growth in plate structures with ultrasonic guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(4): 393-404.
- [7] VERSTRYNGE E, DE WILDER K, DROUGKAS A, et al. Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission sensing techniques[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 898-907.
- [8] 王建国,李璐,王连庆,等.I-Ⅲ型复合加载下铝合金疲劳裂纹扩展速率[J].北京科技大学学报,2011,33(6): 734-738.
- WANG J G, LI L, WANG L Q, et al. Fatigue crack growth rate of aluminum alloys under I-Ⅲ combined loading[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 734-738 (in Chinese).
- [9] COLOMBO C, DU Y, JAMES M N, et al. On crack tip shielding due to plasticity-induced closure during an overload[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(12): 766-777.
- [10] SALVATI E, O'CONNOR S, SUI T, et al. A study of overloading effect on fatigue crack propagation using EBSD, FIBDIC and FEM methods[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 167: 210-223.
- [11] 陈健,袁慎芳,王卉,等.基于高斯权值-混合建议分布粒子滤波的疲劳裂纹扩展预测[J].航空学报,2017,38(11): 220925.
- CHEN J, YUAN S F, WANG H, et al. Using Gaussian weighting mixture proposal distribution particle filter for fatigue crack growth prediction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 220925 (in Chinese).
- [12] CHAPETTI M D, STEIMBREGER C. A simple fracture mechanics estimation of the fatigue endurance of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 23-34.
- [13] 柴国钟,吕君,鲍雨梅,等.表面裂纹疲劳扩展和寿命计算的高效高精度数值分析方法[J].航空学报,2017,38(12): 221291.
- CHAI G Z, LV J, BAO Y M, et al. A highly efficient and accurate numerical analysis method for fatigue propagation of surface crack and life prediction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(12): 221291 (in Chinese).
- [14] CAI J, YUAN S, QING X P, et al. Linearly dispersive signal construction of Lamb waves with measured relative wavenumber curves[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 221: 41-52.
- [15] 蒋黎星,侯进.基于集成分类算法的自动图像标注[J].自动化学报,2012,38(8): 1257-1262.
- JIANG L X, HOU J. Image annotation using the ensemble learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(8):

- 1257-1262 (in Chinese).
- [16] LUO C, WANG Z, WANG S, et al. Locating facial landmarks using probabilistic random forest[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(12): 2324-2328.
- [17] 魏静明, 李应. 利用抗噪纹理特征的快速鸟鸣声识别[J]. 电子学报, 2015, 43(1): 185-190.
- WEI J M, LI Y. Rapid bird sound recognition using anti-noise texture features[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(1): 185-190 (in Chinese).
- [18] 王晓军, 袁平, 毛志忠, 等. 基于随机森林的风洞马赫数预测模型[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1494-1505.
- WANG X J, YUAN P, MAO Z Z, et al. Wind tunnel Mach number prediction model based on random forest [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37 (5): 1494-1505 (in Chinese).
- [19] GENUER R, POGGI J-M, TULEAU-MALOT C, et al. Random forests for big data [J]. Big Data Research, 2017, 9: 28-46.
- [20] PING W, ZHU X. Infer the fact of a case with D-S evidence theory[C] // 2009 ETP/IITA World Congress in Applied Computing, Computer Science, and Computer Engineering, 2009: 299-302.
- [21] 蒋雯, 吴翠翠, 贾佳, 等. D-S 证据理论中的基本概率赋值转换概率方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31 (2): 295-299.
- JIANG W, WU C C, JIA J, et al. A probabilistic transformation of basic probability assignment (BPA) in D-S evidence theory[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(2): 295-299.
- [22] 井立, 杨智春, 张甲奇. 基于信息融合技术的结构损伤检测方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 91-95, 101.
- JING L, YANG Z C, ZHANG J Q. Structural damage detection method based on information fusion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (7): 91-95, 101 (in Chinese).
- [23] FAN X, ZUO M J. Fault diagnosis of machines based on D-S evidence theory. Part 1: D-S evidence theory and its improvement[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27 (5): 366-376.

(责任编辑: 张晗, 李丹)

# A multi-sensor based crack propagation monitoring research

CHANG Qi \* , YANG Weixi, ZHAO Heng, MENG Yao, LIU Jun, GAO Heming

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*

**Abstract:** Fatigue crack propagation monitoring research is one of the main problems of structural health monitoring. In order to ensure the reliable and safe operation of metal structures, it is necessary to monitor the fatigue crack growth process of structures in real time. Aiming at the problem of structural crack propagation, this paper adopts two sensors, PieZoelectric Transducers (PZT) and resistance strain gauge, and proposes a comprehensive monitoring method to combine crack monitoring with passive monitoring method for continuous monitoring of structural damage and active monitoring method sensitive to small damage, so as to improve the monitoring level of crack propagation. In this paper, the random forest algorithm is used to identify the crack length, and the D-S evidence theory is used to fuse the recognition results of the two sensors. The crack propagation recognition result is more accurate and reliable than the single sensor. In this paper, the experimental study on crack propagation monitoring based on strain and active Lamb wave is carried out. verifying the effectiveness and practicability of the method for improving the accuracy of crack propagation monitoring and identification.

**Keywords:** fatigue crack propagation; Lamb wave; Random Forest (RF); data fusion; D-S evidence theory

---

Received: 2019-08-02; Revised: 2019-09-09; Accepted: 2019-10-21; Published online: 2020-02-25 00:00

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200221.html>

**Foundation items:** Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2018JM5112); Special Scientific Research Project of Shaanxi Province Education Department (15JK1496); National Natural Science Foundation of China (51406164, 51775429)

\* Corresponding author. E-mail: cqhardrocker@163.com